

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

HOUŽEVNATOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ A JEJÍ ZKOUŠENÍ

TOUGHNESS OF METTALLIC MATERIALS AND ITS TESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MICHALISKO

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. KAREL NĚMEC, PH.D

BRNO 2010



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o houževnatosti, jako mechanické vlastnosti kovových materiálů. Definiuje houževnatost a její projevy. Popisuje tranzitní chování některých kovů při statickém a dynamickém zatížení. Dále práce popisuje jednotlivé zkušební metody (Charpyho, Izodova, DWT, DT, DWTT). Zahrnuje historické souvislosti zkoušení houževnatosti.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Houževnatost, Charpyho zkouška, Izodova zkouška, tranzitní chování

ABSTRACT

This bachelor work deals with toughness as a mechanical property of metal materials. It defines the toughness and its demonstrations. It describes the transient behaviour of some metals at the static and dynamic load. Furthermore, the work describes the particular testing methods (Charpy's, Izod's, DWT, DT, DWTT). It covers the historical consequences of toughness testing.

Key words:

Toughness, Charpy's test, Izod's test, transient behaviour



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MICHALISKO, J. Houževnatost kovových materiálů a její zkoušení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci *Houževnatost kovových materiálů a její zkoušení* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Němce, Ph.D. a že jsem v seznamu literatury uvedl všechny použité zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2010

.....

Jan Michalisko



PODĚKOVÁNÍ

Na tom to místě bych rád poděkoval Ing. Karlu Němcovi, Ph.D za vedení této bakalářské práce, za poskytnutí odborných podkladů a konzultací pro vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat nejbližším a hlavně rodičům, kteří mě motivovali a podporovali nejen v tvorbě bakalářské práce, ale během celého mého dosavadního studia.



Obsah

1. Úvod	6
2. Houževnatost	7
2.1. Definice houževnatosti materiálu a její význam.....	7
3. Tranzitní chování kovů.....	8
3.1. Podstata vzniku křehkého lomového chování v tahu u oceli.....	8
3.2. Tranzitní chování oceli při zkouškách rázem v ohybu	10
3.3. Vliv interních faktorů na tranzitní lomové chování oceli.....	12
3.4. Vliv externích faktorů na tranzitní lomové chování oceli	14
4. Historie zkoušení houževnatosti.....	15
5. Popis metod zkoušení houževnatosti.....	18
5.1. Zkouška rázem v ohybu dle Charpyho	18
5.2. Izodova zkouška	21
5.3. Zkouška padajícího závaží - DWT	21
5.4. Zkouška rázem v ohybu velkých těles – DT (dynamic tear).....	22
5.5. Zkouška padajícího závaží - DWTT.....	23
6. Ohlédnutí do historie – potopení lodi Titanic.....	25
7. Závěr.....	28
8. Použitá literatura.....	29



1. ÚVOD

Projevem každého materiálu jsou jeho mechanické vlastnosti, které podmiňují jeho vhodnost pro určení funkcí a použití v praxi. Díky neustálému vývoji a inovacím jsou kladeny stále vyšší nároky na mechanické vlastnosti používaných materiálů. Cílem člověka je poznávání a zlepšování mechanických vlastností konstrukčních materiálů za účelem uspokojení svých potřeb a zvýšení komfortu jeho života.

Kovy jako konstrukční materiál jsou pro své specifické vlastnosti nenahraditelné a stále se hledají možnosti, jak zlepšit jejich mechanické vlastnosti. Proto materiály zkoumáme více do hloubky a vystavujeme je různým podmínkám namáhání, které simulují funkci stroje nebo zařízení tak, aby se předešlo ztrátě jejich funkčnosti. Cílem zkoušení je zaručení bezpečnosti, spolehlivosti a životnosti vyráběných strojů a konstrukcí. Nástrojem tohoto zkoumání je vystavení zkoumaných kovových materiálů sérii zkoušek, které charakterizují jejich základní mechanické vlastnosti, a to pružnost, pevnost, plasticitu a houževnatost. Tato práce je zaměřena na houževnatost, tedy na odolnost materiálu vůči porušení.

Využití a zohlednění informací o míře houževnatosti materiálu je důležité v celé řadě oblastí, vztahuje se nejen na letecký průmysl, automobilový průmysl, lodní průmysl, dále pak při konstrukci potrubí na ropu, plyn a jiné produkty, též při stavbě mostů a ocelových konstrukcí budov, stožárů a podobně, u nichž selhání materiálu může mít katastrofální následky. Z historie je bohužel známa celá řada havárií, které byly vyvolány nečekaným křehkým lomem. Některé z těchto havárií budou v této práci též zmíněny.

2. HOUŽEVNATOST

2.1. Definice houževnatosti materiálu a její význam

Houževnatost je definována jako mechanická vlastnost vyjádřená velikostí mechanické energie potřebné k vyvolání plastické deformace v materiálu nebo jeho porušení. Vyvolání této mechanické energie je zapotřebí určitá velikost mechanické práce. Hodnota této mechanické práce představuje míru houževnatosti a tudíž hodnota této mechanické práce závisí na zkoušeném materiálu. U kovů je houževnatost větší, čím je větší práce spotřebovaná na vyvolání plastické deformace.

Houževnatost má význam v oblasti:

- namáhaných konstrukčních ocelí, jako jejich mechanická vlastnost, která charakterizuje odolnost vzniku křehkého lomu.
- technologie zpracování kovu, zejména u tváření, kde houževnatost slouží jako měřidlo měrného odporu kovu proti vzniku plastické deformaci. Kov s nízkou houževnatostí se dají tvářet za vynaložení malých tvářecích sil a energie, tedy se snadno ohýbají, lisují, válcují, protlačují a podobně.[1]

Za opak houževnatosti je považována křehkost. Křehké kovy se před porušení prakticky nedeformují a mají tedy malé hodnoty houževnatosti. Z fyzikálního hlediska lze považovat za křehké ty kovy, které mají malou pohyblivost a malou manévrovatelnost dislokací a oba jevy nastávají současně. Z pohledu makroskopického je projevem těchto materiálů velmi nízká energie, potřebná na vyvolání plastické deformace v materiálu. Z tohoto pohledu jsou křehké materiály současně neplastické. Naproti tomu materiály houževnaté mají dobrou pevnost i plasticitu, z čehož vyplývá, že pojem křehkost z fyzikálního hlediska nevystihuje dokonale houževnatost.

3. TRANZITNÍ CHOVÁNÍ KOVŮ

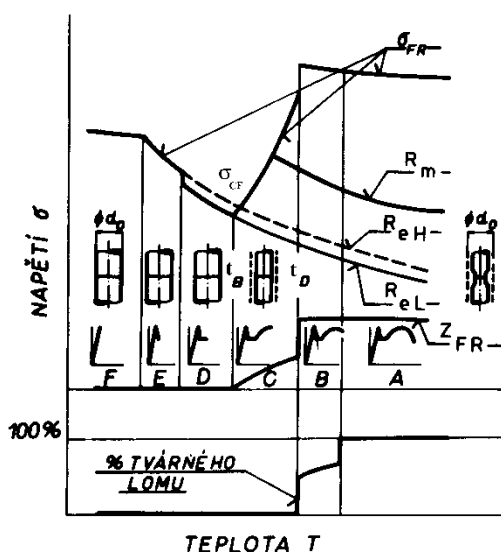
Na rozdíl od materiálů jako je sklo nebo keramika, které jsou křehké prakticky za všech okolností, v případě většiny kovových materiálů tomu tak není. Některé kovy se však za určitých podmínek namáhání poruší lomem houževnatým a za jiných podmínek namáhání se součást ze stejného materiálu poruší křehkým lomem. Zpravidla stačí, aby došlo ke:

- snížení provozní teploty,
- nárůstu rychlosti zatěžování
- vzniku vrubu nebo trhliny na zatěžovaném tělese

Následkem toho dojde ke změně lomového chování místo houževnatého lomu se objeví lom křehký. Změně, nebo také přechodu v lomovém chování ocelí říkáme tranzitní lomové chování a je typické pro kovy s mřížkou BCC. Tato mřížka totiž není těsně uspořádaná a následkem toho má kritické skluzové napětí relativně vysoké (o dva řády vyšší než těsné uspořádání, cca 30MPa, materiál se jeví jako pevný). Protože obsahuje dostatek skluzových rovin a směrů, více než 12 nezávislých skluzových systémů, je za normálních teplot materiál s touto krystalografickou mřížkou houževnatý. Ale v závislosti na poklesu teploty, růstu rychlosti zatěžování nebo vrubu výrazně roste odpor materiálu vůči pohybu dislokací (vysoké skluzové napětí) a dochází k poklesu počtu aktivních skluzových systémů, tedy počtu nezávislých směrů, ve kterých se dislokace jsou schopny reálně pohybovat. Za nízkých teplot nebo vysokých rychlostí deformace může tedy dojít k poklesu počtu aktivních skluzových systémů na méně než 5 a následně ke změně mechanismu porušení. Z materiálu houževnatého se tak stává křehký. S typickým příkladem tohoto chování se můžeme setkat u běžných konstrukčních ocelí, protože obsahují ferit, který má mřížku BCC.

3.1. Podstata vzniku křehkého lomového chování v tahu u oceli

Tranzitní křivka při tahové zkoušce byla naměřena teprve v 60. letech 20. století, kdy došlo k rozvoji kryogenní techniky a bylo možné provést zkoušky až do teplot kapalného helia – 269°C (4K). Na obr. 3.1 jsou schematicky zakresleny teplotní závislosti materiálových charakteristik – horní a dolní meze kluzu R_{eH} , R_{eL} , meze pevnosti R_m , skutečného lomového



Obr. 3.1: Tranzitní chování oceli při zkoušce tahem

napětí $\sigma_{FR} = \frac{F_{FR}}{S_{FR}}$, zúžení Z a % tvárného lomu na

lomové ploše. Podle charakteru porušení a podle poměru σ_{FR} k mezi kluzu lze graf rozdělit na šest oblastí porušení.

OBLAST A – tvárný lom po velké plastické deformaci, zúžení Z dosahuje vysokých hodnot, mez kluzu i mez pevnosti s klesající teplotou rostou, skutečné lomové napětí se s teplotou příliš nemění. Tvar lomu je na obr. 3.2.




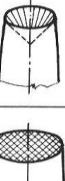

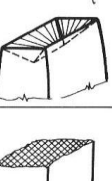


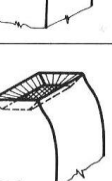
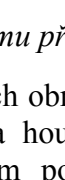
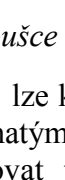
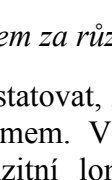
OBLAST B – smíšené porušení, uprostřed lomové plochy je lom tvárný a na okrajích štěpný, k lomu dochází po vzniku krčku. I v této oblasti v závislosti na poklesu teploty jak mez kluzu, tak i pevnost rostou. Tvar lomu viz obr. 3.2.

OBLAST C – velikost deformace do porušení v závislosti na poklesu teploty klesá, lom je štěpný (0% tvárného lomu), k lomu dochází dříve, než se vytvoří krček, skutečné lomové napětí s klesající teplotou prudce klesá. Na konci oblasti C je lomové napětí rovno mezi kluzu, mez kluzu s klesající teplotou roste, tvar lomu je na obr. 3.2.

OBLAST D – k lomu dochází při napětí $\sigma_{FR}=R_{eL}$ v celé oblasti, Z je nulové. Z makroskopického hlediska bylo v této oblasti dosaženo křehkého lomu. Tvar lomu je znázorněn obr. 3.2.

OBLAST E - štěpný lom při napětí $\sigma_{FR}=R_{eH}$ v celé oblasti.

OBLAST F – až do této oblasti mez kluzu monotónně rostla při poklesu teploty a k lomu nikdy nedošlo při napětí menším, než je mez kluzu. V této oblasti je lomové napětí menší než mez kluzu a s klesající teplotou se lomové napětí prakticky nemění (metalograficky bylo ukázáno, že lomové napětí kopíruje napětí počátku plastické deformace a v této oblasti je kluzová deformace nahrazena deformací dvojčatovou). [2]

LOM		T V A R L O M U		
		KRUHOVÝ PRIEREZ		ŠTVORHRANNÝ PRIEREZ
OZN.	NÁZOV	POHĚAD	OSOÝ REZ	POHĚAD
A	BODOVÝ			
B	ŠMYKOVÝ, STŘEDOVÝ			
C	KŘEHKÝ			
D	DUTINOVÝ			

Obr. 3.2: Vzhled lomu při zkoušce tahem za různých teplot [1]

Vyhodnocením informací popisujících obr. 3.1 lze konstatovat, že existuje přechodová oblast (oblast C) mezi křehkým lomem a houževnatým lomem. V této oblasti lze u hladkých zkušebních těles při zkoušce tahem pozorovat tranzitní lomové chování. Oblast C je vymezena teplotami t_D - tranzitní teplotou křehkosti a t_B -teplotou houževnatosti. Při hodnotě t_B lze zaznamenat důležitou hodnotu lomového napětí σ_{CF} , která je při dané teplotě nejvyšší. Toto napětí je označeno jako „kritické lomové napětí“. Jeho velikost závisí na typu oceli (struktuře) a je menší než teoretická pevnost. Hodnoty R_e a R_m v tab. 3.1. jsou naměřeny při teplotě +20 °C. [2]

Tab. 3.1: Hodnoty materiálových charakteristik vybraných ocelí [2]

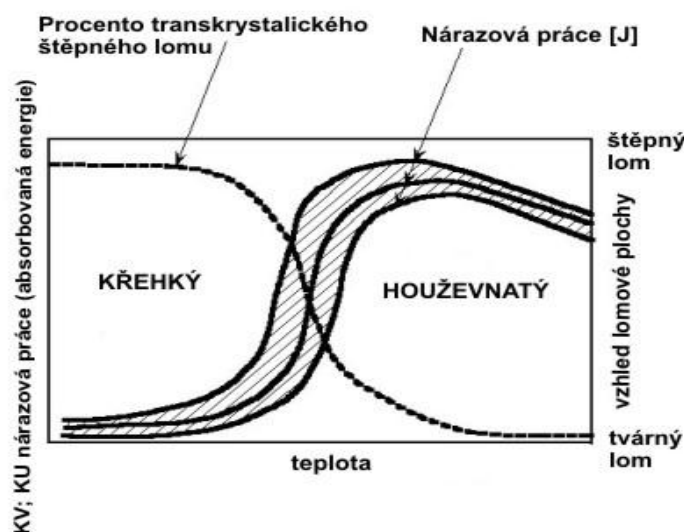
Ocel	R_e [MPa]	R_m [MPa]	$\varnothing d$ [mm]	σ_{CF} [MPa]
11 368	248	377	0,024	880
11 523	335	531	0,019	915
13 030	317	482	0,015	1030
15 123	350	503	0,030	920

V reálném životě se s podmínkami jako u zkoušky tahem, kde je jen jednoosá napjatost a konstantní rychlostí zatěžování, moc často nesetkáme. Častěji má těleso na povrchu koncentrátor napětí a je zatížené dynamickým zatížením. Proto se tahové zkoušky stanovení tranzitního chování běžně nepoužívá. Prakticky se využívá k určení tranzitní křivky zkouška rázem v ohybu podle Charpyho.

3.2. Tranzitní chování oceli při zkouškách rázem v ohybu

V praxi je zkouška rázem v ohybu nejrozšířenější zkouškou hodnocení odolnosti ocelí proti křehkému lomu. Je stanovována hodnota velikosti nárazové práce, jako kritérium odolnosti materiálu proti vzniku křehkého lomu.

Princip zkoušky spočívá v přerážení zkušebních tyčí normovaných rozměrů. Jednotlivé typy tyčí jsou uvedeny dále (viz kapitola 5.1, tab.5.1). Při zkoušce se měří nárazová práce za různých teplot a ze získaných hodnot nárazové práce se následně vykreslí křivka závislosti nárazové práce na teplotě zkušební vzorku. Na obr. 2.3 je znázorněna jak hodnocení lomu z hlediska energetického, tak i oblasti odpovídající vzhledu lomové plochy vzorku.



Obr. 3.3: Závislost nárazové práce a vzhledu lomové plochy [2]

Dále vyhodnocujeme:

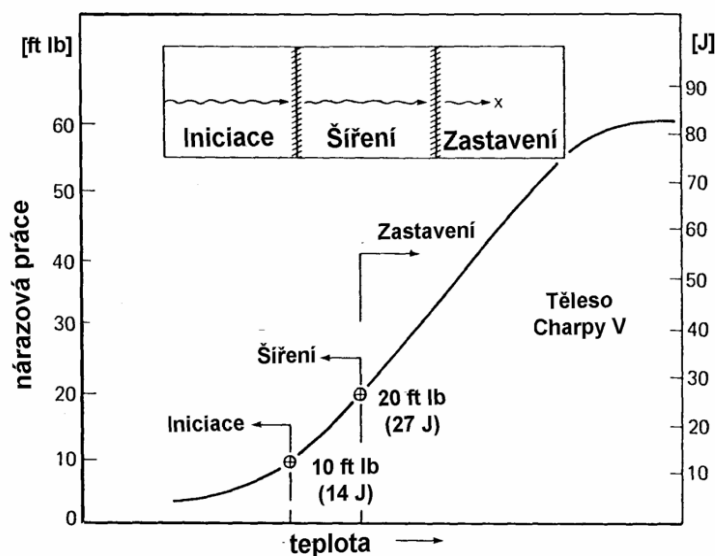
- střední nárazovou práci jako součet maximální nárazové práce K_{max} a minimální K_{min} podělené dvěma:

$$K_{stř} = \frac{K_{max} + K_{min}}{2}$$

- stanovená (dohodnutá) kritériální hodnota nárazové, např. $K=27J$

První pokusy o nalezení kritériální hodnoty nárazové práce byly provedeny v souvislosti s rozbořem havárií lodí Liberty. Výsledky těchto studií jsou schematicky uvedeny na obr. 3.4.

Na jejich základě byla stanovena hodnota nárazové práce pro nešíření trhliny a bylo zjištěno, že odpovídá 27 J. Hodnota 27 J leží u ocelí zpravidla v ohybu tranzitní křivky, nad touto hodnotou nárazová práce s teplotou prudce vzrůstá. Tak se stalo, že se kritériální hodnota nárazové práce začala používat jak v normativních nebo doporučeních pro volbu materiálu tak i při posuzování jakosti materiálu.

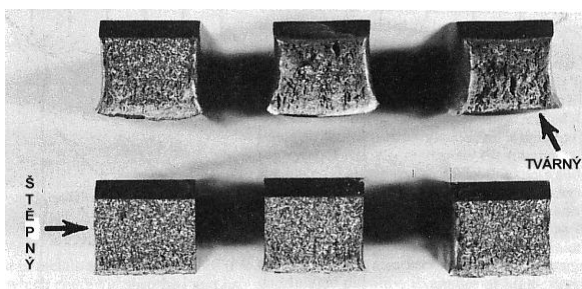


obr. 3.4: Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu [7]

Později se ukázalo, že kritériální hodnota 27 J platí pouze pro C-Mn oceli s nižší mezí kluzu (230-270) MPa, tloušťkou stěny 10-38 mm a podmínky namáhání spojené s provozem lodě [2]. Neplatí např. pro oceli s vyšší mezí kluzu. Proto jsou v současných normách stanoveny i další varianty kritériální hodnoty nárazové práce, a to 40 J a 60 J.

Vzhled lomové plochy

Na obr. 3.5 jsou ukázány tvary 6 lomových ploch nelegované oceli. V bezprostředním okolí lomové plochy houževnatého zkušební vzorku je výrazná deformace – z hlediska vzhledu resp. mechanismu lomu hovoříme o tvárném porušení (obr. 3.5 nahoře). V závislosti na poklesu teploty od jisté teploty hodnota nárazové práce klesá a mění se jak rozsah plastické deformace v okolí lomové plochy, tak i její vzhled. Na lomové ploše se objevují malé lesklé plošky, dochází ke štěpení krystalové mřížky feritických zrn. Tento lom označujeme jako štěpný transkrystalický lom (obr. 3.5 dole). Štěpný lom se vyznačuje lesklými ploškami, které vznikají štěpením feritické struktury. Při čistě štěpném lomu se těleso vizuálně nedeformuje, oblast deformací je minimální.



Obr. 3.5: Vzhled lomové plochy zkušebních tyč

3.3. Vliv interních faktorů na tranzitní lomové chování oceli

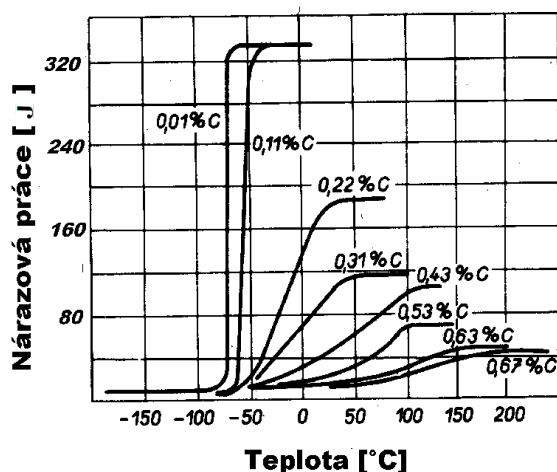
Hodnocení vlivu interních faktorů na křehkolomové chování ocelí se zpravidla používá nárazová práce měřená zkouškou rázem v ohybu na rázovém kladivu.

Velikost zrna

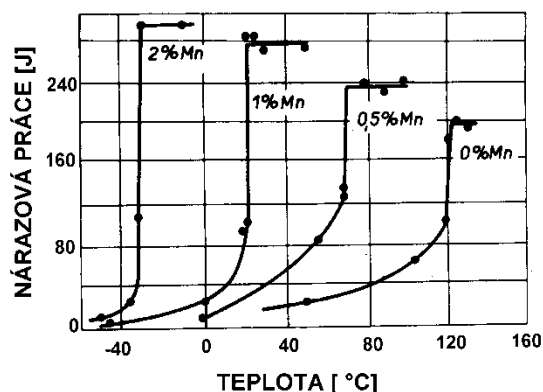
Jemnější zrna příznivě ovlivňuje odolnost proti křehkému lomu (tranzitní teploty jsou posunuty směrem k nižším teplotám ve srovnání s hrubozrnnými ocelmi), ale i zvyšuje mez kluzu. Získání jemného zrna je možné normalizačním žiháním. Další možností zajištění jemnozrnné struktury je výroba termomechanickým zpracováním, ale v tom případě je nutné, aby ocel byla uklidněná.

Chemické složení

Zásadní vliv na strukturu oceli má uhlík, který určuje podíl feritu a perlitu ve struktuře, případně typ martenzitu nebo bainitu. Oceli s feriticko – perlitickou strukturou představují základní typ ocelí o $R_m < 900$ MPa. Vliv obsahu uhlíku na hodnotu nárazové práce KV normalizačně žihané oceli je na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Vliv obsahu uhlíku a teploty na KV



Obr. 3.7: Vliv obsahu Manganu na KV

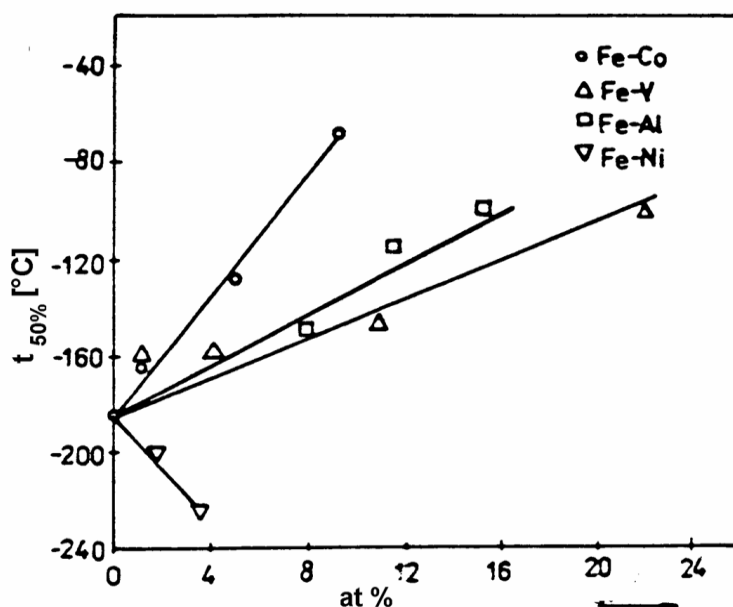
Dalším prvkem, který běžné konstrukční oceli obsahují, je mangan. Na obr. 3.7 je uveden vliv přísady tohoto prvku na změnu tranzitního lomového chování nízkouhlíkové oceli (0,05% C). Je vidět, že s rostoucím obsahem manganu nastává výrazný posun tranzitní křivky k nižším teplotám. Snížení náchylnosti ke vzniku křehkého lomu zvyšováním obsahu manganu je způsobeno zejména dvěma faktory:

- rostoucí obsah Mn (až do 2%) zjemňuje zrna oceli
- s růstem obsahu Mn se mění složení karbidů a hlavně jejich tvar – z lamelk se stávají globule.

Lze tedy konstatovat, že mangan neovlivňuje energii spojenou se štěpením feritu, ale ovlivňuje strukturní parametry jako je velikost zrna a tvar karbidů. Proto o vlivu manganu z hlediska křehkolomového chování je nutné hovořit ve vztahu ke struktuře feriticko-perlitické a ne obecně. U ocelí se strukturou popuštěného martenzitu příp. bainitu může být vliv Mn opačný.

Většina svařitelných jemnozrnných ocelí je uklidněna hliníkem a proto i přísada hliníku ve vhodném množství snižuje náchylnost ocelí ke křehkému lomu. Oceli uklidněné hliníkem tvoří základ tzv. mikrolegovaných ocelí. I v případě hliníku je zde vliv na strukturu a tedy vliv nepřímý.

Přímý vliv legujících prvků na křehkolomové chování ocelí dokumentuje závislost na obr. 3.8. Na tomto obrázku je vynesena tranzitní teplota $t_{50\%}$ v závislosti na at. % různých legujících prvků. Ukázalo se, že pouze jediný prvek, kterým je Ni, zvyšuje odolnost kovové matrice vůči štěpnému porušení, a má tedy „přímý“ vliv na zvýšení odolnosti oceli vůči křehkému lomu. Obecně Ni v malých množstvích (do 0,5 %) snižuje mírně tranzitní teplotu normalizačně žíhaných ocelí. S rostoucím obsahem Ni se tranzitní oblast postupně posouvá k nižším teplotám. Při obsahu Ni kolem 9% se již tranzitní oblast nevyskytuje až do teploty kapalného dusíku (-196°C).



Obr.3.8: Vliv legujících prvků na tranzitní teplotu

Stárnutí oceli

Zvláště neuklidněné oceli jsou náchylné ke stárnutí. Z přesyceného tuhého roztoku se vylučují karbidy a nitridy, což vede k nárůstu deformačního napětí a tím k posuvu tranzitních teplot směrem k vyšším teplotám.

Tepelné zpracování

Normalizační žíhání je z hlediska houževnatosti materiálu příznivé, neboť se při něm zjemňuje zrna materiálu. Žíhání na odstranění zbytkových napětí zpravidla též zvyšují odolnost vůči křehkému lomu, zejména u feritické oceli.

3.4. Vliv externích faktorů na tranzitní lomové chování oceli

Rychlost zatěžování

Projevuje se nepříznivě, s jejím vzrůstem dochází k posuvu tranzitní oblasti směrem k vyšším teplotám.

Konstrukční vruby

Posouvají tranzitní teploty výrazně směrem k vyšším hodnotám. Proto není překvapující, že asi 90% případů výskytu štěpného lomu u svařovaných konstrukcí bylo iniciováno z trhlin ve svarových spojích. Za přítomnosti defektů dochází k lomu při nominálních napětích nižších než je mez kluzu.

Vliv tloušťky

Vliv tloušťky se projevuje dvojím způsobem. U tlustých plechů nelze zajistit metalurgickou rovnoměrnost, ve středu plechu je v důsledku menšího přetváření při válcování hrubší zrna a jsou zde zpravidla nečistoty. Zatímco u kořene vrubu v tlusté stěně vzniká trojosá napjatost (rovinná deformace), kdežto u tenkých plechů je spíše rovinná napjatost.

4. HISTORIE ZKOUŠENÍ HOUŽEVNATOSTI

Historie laboratorního zkoušení houževnatosti kovů začíná počátkem minulého století. Na sjezdu Mezinárodního svazu pro technické zkoušení materiálu r. 1901 v Budapešti přednášel Francouz G. Charpy o svých zkouškách zjišťování houževnatosti přerážením zkušebních tyčí opatřených vrubem. Vznik této zkoušky byl motivován nutností doplnit základní mechanické vlastnosti zjištěné při tahové zkoušce kritériem, které by zohledňovalo odolnost materiálu vůči křehkému porušení při rázovém zatížení. Na IV. kongresu r. 1906 v Bruselu referoval o zkušenostech se zkouškou ve Francii a uváděl dva tvary tyčí a dvě velikosti strojů sloužících ke zkoušení. Konečně na V. kongresu v Kodani r. 1909 bylo doporučeno normování Charpyho zkoušky, která se brzy rozšířila po celém evropském kontinentě. V Anglii navrhl Izod odlišný způsob provádění zkoušky. Charpy ukládá zkušební tyč na dvě pevné podpory a vede ráz doprostřed proti vrubu, Izod vetknul tyč až ke vrubu do upínače a na volný konec nechal působit ráz.

Za I. světové války se Mezinárodní svaz pro technické zkoušení rozpadl a po ní nastal v metodice Charpyho zkoušky dokonalý chaos. Původní velká Charpyho tyč se ukázala prakticky nevhodnou a byla v různých zemích změněna na průřez 20 x 20 nebo 20 x 15 mm. I ve tvarech vrubů vznikla neobyčejná rozmanitost. Výsledky zkoušek na různých tyčích se lišily a nedaly se nijak převádět a srovnávat. Tím vznikly neobyčejné potíže v obchodních stycích. Ve dvacátých letech se proto často ozývaly vážné hlasy odsuzující vrubovou zkoušku jako prakticky neupotřebitelnou a některé hutě ji odmítaly uznat za zkoušku přejímací. Celý tento chaos vyplynul z neznalosti základních procesů probíhajících v materiálu při zkoušce rázem v ohybu.

Roku 1927 byl na kongresu v Amsterodamu ustaven nový mezinárodní svaz pro zkoušení materiálu, kde bylo pro nejednotnost názorů dohodnuto učinit vrubovou zkoušku předmětem zvláštního jednání na příštím kongresu, který se konal r. 1931 v Curychu. Bohužel ani na tomto kongresu nebylo možno názory sjednotit a výsledky celého dlouhého jednání lze shrnout asi takto: Téměř jednomyslně bylo konstatováno, že má vrubová zkouška velkou praktickou důležitost, že však je nevyhnutelně potřebí mezinárodní sjednocení zkušební tyče. Za nejlépe vyhovující byla jednomyslně uznána dodnes používaná velikost 10 x 10 x 55 mm.

Před druhou světovou válkou začala být používána nová technologie ke spojování ocelových materiálů, a to svařování, které nahradila proces nýtování konstrukcí. Začalo však docházet k porušení mezi svarem a svařovanými materiály náhlým křehkým lomům, které bylo inicializováno v defektech, a též k němu docházelo při poklesu teploty. Jako příklad lze uvést několik katastrofální porušení mostů, kde jeho konstrukce byla vyrobena z konstrukčních uhlíkových ocelí, vyrobených ve vzduchových konvertorech. Mosty se porušily náhlým lomem při nízkém proměnlivém zatížení a po krátkém používání. Materiálová analýza ukázala, že šlo o křehké lomy. Avšak i přes častý výskyt těchto vad byly konstrukce nadále dimenzovány podle hodnoty meze statické pevnosti v tahu.

Důslednější přístup nastal v období 2. světové války, kdy docházelo k velkému počtu nehod svařovaných lodí. Od Listopadu 1942 do dubna 1946 se na 976 svařených námořních plavidlech USA objevilo 1442 vážných poškození formou trhlin různých velikostí. Většina těchto lomů vycházela z konstrukčních vrubů a z defektů ve svarech. Konstrukčními úpravami nosných dílů trupu lodi a vsazením zastavovačů trhlin v kritických místech se podstatně zredukoval výskyt křehkých lomů. Zkoušky materiálu lodí ukázaly, že kromě konstrukčních chyb byla jedním z primárních faktorů, které přispěly k porušení, i nízká kvalita použité oceli.

Mezi známá porušení lodí křehkým lomem patří příběh tankeru T2 Schenectady. Ten byl spuštěn na vodu 31. prosince 1942 v loděnici Kaiser na ostrově Swan u Portlandu v Oregonu. 16. ledna 1943 se vracel ze zkušební plavby zpět do montážního přístavu za chladného počasí. Tanker v poklidu zakotvil v přístavu a po chvíli se náhle bez varování příčně rozlomil (viz Obr. 4.1). Hluk z havárie byl slyšet až jednu míli daleko. Loď se přelomila v části za kapitánským můstkem, kde byla paluba příčně rozdělena, nosníky a přepážky byly odtržené. Soudržnost si zanechal pouze kýl lodí. Loď se nepotopila, protože její dvě části se opřely o dno přístavu a tedy zabránily ponoření rozlomené části. Vyšetřováním bylo zjištěno, že důvodem havárie byl vznik křehkého lomu z důvodu poklesu teploty a tím ztráty houževnatosti. V Americe bylo mezi roky 1942 až 1945 vyrobeno těchto tankerů asi 500 kusů. Jejich výroba byla rychlá, jeden tanker T2 trval asi 70 dní do prvního vyplutí. Tanker T2 Schenectady byl úspěšně opraven a poté vypuštěn na moře.



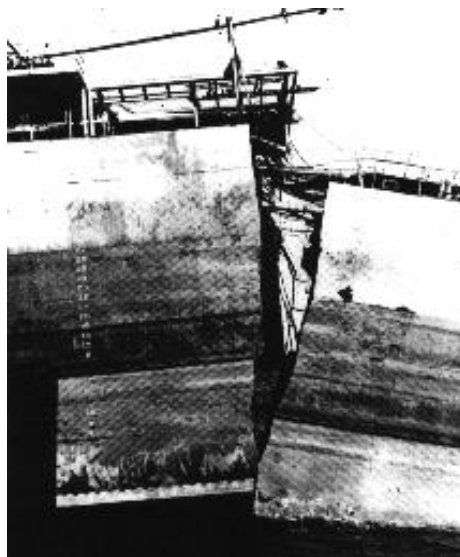
Obr. 4.1: rozlomený tanker T2 [8]

Ke stejné kategorii lodí s totožným problémem lze řadit i známé lodě Liberty. Tyto lodě byly vyráběny za účelem rychlého zásobování Evropy zasaženou válkou. V roce 1940 bylo vyrobeno těchto lodí 200 kusů. Proto, aby bylo možné vyrábět takové množství lodí za tak krátký interval byla pro výrobu použita metoda svařování jednotlivých už předem vyrobených částí lodě namísto do té doby používaného nýtování. Výroba těchto plavidel z počátku trvala 70 dní, ale ke konci války byla zkrácena na 2-3 týdny a rekordní čas výroby jedné lodi byl 4 dny a 15 hodin. Lodě se vyráběly ve speciálních docích viz obr. 4.2.



Obr. 4.2: Výrobní loděnice pro lodě Liberty[8]

Nevýhodou snahy o co nejkratší dobu výroby bylo, že dělníci nebyli plně kvalifikováni svářeči, a svařované části nebyly příliš kontrolovány. Z počátku lodě nebyly testovány vůbec a svary obsahovaly póry, vměstky a nečistoty. Následně při misi se na lodích objevovali trhliny různých velikostí nebo v krajním případě došlo přímo k úplnému rozlomení lodí na dvě části viz obr. 4.3.



Obr. 4.3: Rozlomení lodě typu Liberety [8]

Uvedené havárie a poškození lodí přinutily Americký úřad pro lodní dopravu v r. 1947 zavést určité normy pro chemické složení oceli používaných na stavbu lodí. I když byly používány zastavovače trhlín a došlo ke konstrukčním zlepšením i k úpravě chemického složení ocelí na stavbu lodí, křehké lomy se v omezené míře vyskytovaly i nadále a můžeme se s nimi občas setkat až dosud.

5. POPIS METOD ZKOUŠENÍ HOUŽEVNATOSTI

Jednotlivé metody měření houževnatosti vznikly za účelem:

1. Určení pravděpodobnosti výskytu vzniku křehkého lomu daného materiálů za určitých podmínek. (zvonovina, revolver)
2. Výběr vhodného materiálu pro určitý způsob použití (klasifikace oceli)
3. Kontrola kvality při výrobě a přijemce
4. Vyšetřování příčiny lomu při havárii strojních zařízeních nebo konstrukcí (viz historie)
5. Získání hodnot, jako podmínek pro navrhování konstrukci strojů a zařízení.

Pro získání těchto hodnot byly vyvinuty zkušební metody, které se dělí základních hledisek:

Srovnávací zkoušky - zahrnuje body 1-4 \Rightarrow Jednotlivé požadavky na tento typ zkoušek jsou:

- levná výroba zkušební těles
- jednoduché provádění zkoušky
- reprodukovatelnost výsledků

K tomuto účelu se nejčastěji používá zkouška rázem v ohybu.

Specifické zkoušky - hodnoty získané jsou převážně pro konstrukční hledisko určené pro konstruktéra, které usnadní volby vhodné oceli pro konstrukci bezpečnou z hlediska křehkého lomu. Vlivem těchto předpokladů se snažíme zabránit vzniku havárie konstrukce křehkým lomem.

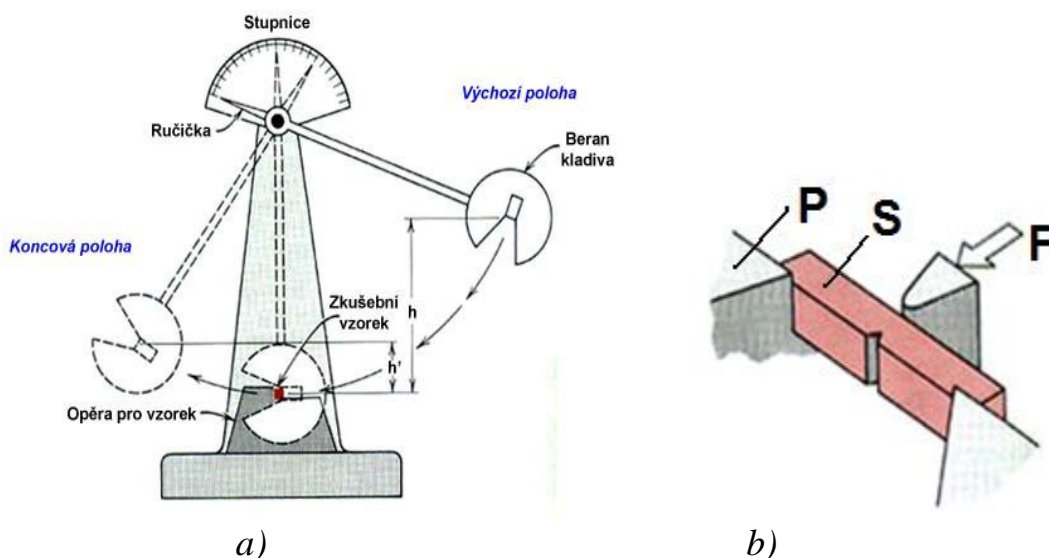
5.1. Zkouška rázem v ohybu dle Charpyho

Cílem zkoušky je určit hodnotu nárazové práce, která je definovaná jako práce spotřebovaná na zlomení zkušební vzorku a to za určitých stanovených podmínek dle Charpyho, které zahrnují:

- Teplotu zkušební tělesa,
- způsob namáhání (trojbodový symetrický ohyb)
- rychlost zatížení
- geometrie a tvar zkušební tělesa (těleso obvykle čtyřhran s rozměry 10x10x55 mm)
- tvar, hloubka a ostrost vrubu.

(bližší informace ke zkoušce udává norma ČSN EN 10 045 - 1)

Princip je schematicky znázorněn na obr. 5.1. Zkušební vzorek **S** s vrubem je ustaven na opěrku **P** tak, aby rovina kladiva protínala osu vrubu. Zkouška proběhne tím způsobem, že je kladivo uvolněno z výchozí polohy a následně svou vahou klesá směrem ke zkušebnímu vzorku. Přitom se mění potenciální energie kladiva na kinetickou. V nejnižší poloze má kladivo maximum kinetické energie, která je využita k přeražení vzorku. Účele zkoušky je zjistit velikost spotřebované energie čili práce na přeražení zkušební tělesa. Spotřebovanou energii zjistíme tak, že určíme velikost potenciální energie kladiva na začátku zkoušky, kdy bylo v určité výšce **h** a konstantní potenciální energie se určí dle vztahu $W_p = F_g \cdot h$, kde F_g je gravitační síla, která je dána hmotností kladiva a gravitačním zrychlením. Na konci zkoušky je určena potenciální energie $W_p' = F_g \cdot h'$ snížená právě o práci potřebnou na přeražení vzorku, tedy hledanou nárazovou práci.



Obr. 5.1: Princip zkoušky zjištění nárazové práce a) schéma Charpyho Kyvadlové kladiva b) ustavení zkušební vzorku

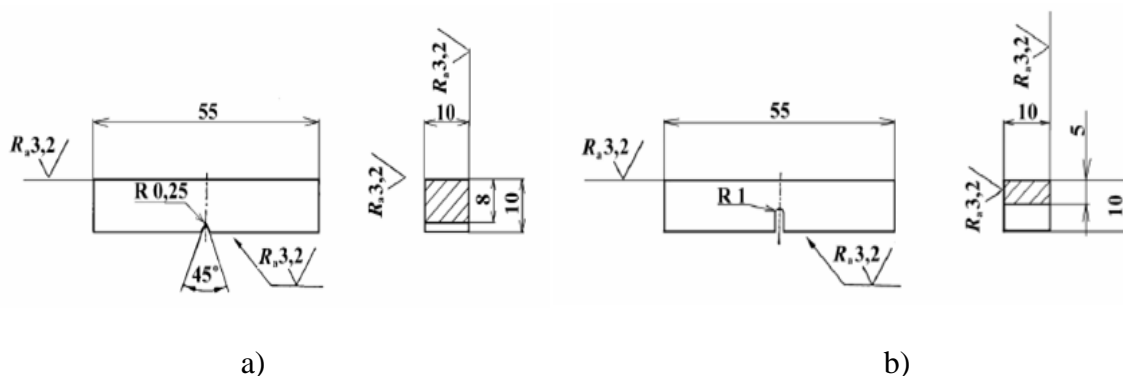
Velikost nárazové práce na přelomení zkušební vzorku se může stanovit výpočtem, tedy rozdílem potenciálních energií

$$K = W_p - W_p' = F_g \cdot h - F_g h'$$

V minulosti nebyla jen zjišťována pouze hodnota nárazové práce, ale i takzvaná vrubová houževnatost. Tato materiálová charakteristika byla definována podílem nárazové práce a plochy výchozího příčného průřezu zkušební tyče pod vrubem. Označení vrubové houževnatosti bylo KCV nebo KCU2 příp. KCU3, kdy třetí písmeno udává tvar vrubu V nebo U a číslice hloubku U-vrubu.

Zkušební vzorky

Základní zkušební tyč je dlouhá 55 mm a je čtvercového průřezu s délkou strany 10 mm. Uprostřed její délky je vrub. Jsou předepsány dva typy vrubů, V a U. Oba typy vzorků jsou znázorněny na obr. 5.2 a jejich rozměry jsou uvedeny v tabulce 5.1.



Obr. 5.2: zkušební tyče s a) V-vrubem b) U-vrubem [7]

Tab. 5.1: Rozměry a velikosti jednotlivých zkušebních tyčí s V a U vrubem [2]

Označení	Zkušební tyč s U vrubem		Zkušební tyč s V vrubem	
	Jmenovitý rozměr	Mezní úchytky	Jmenovitý rozměr	Mezní úchytky
Délka	55 mm	$\pm 0,60$ mm	55 mm	$\pm 0,60$ mm
Výška	10 mm	$\pm 0,11$ mm	10 mm	$\pm 0,11$ mm
Šířka:				
- základní zkušební tyč	10 mm	$\pm 0,11$ mm	10 mm	$\pm 0,11$ mm
- zkušební tyč menších rozměrů	-	-	7,5 mm	$\pm 0,11$ mm
- zkušební tyč menších rozměrů	-	-	5 mm	$\pm 0,06$ mm
Úhel vrubu	-	-	45°	$\pm 2^\circ$
Výška zkušební tyče v místě vrubu	5 mm	$\pm 0,09$ mm	8 mm	$\pm 0,06$ mm
Poloměr zaoblení dna vrubu	1 mm	$\pm 0,07$ mm	0,25 mm	$\pm 0,025$ mm
Vzdálenost mezi rovinou souměrnosti vrubu a konců zkušební tyče				
- při ručním vkládání zkušební tyče na podpěry	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm
- při automatickém vkládání zkušební tyče na podpěry	27,5 mm	$\pm 0,165$ mm	27,5 mm	$\pm 0,165$ mm
Úhel mezi rovinou souměrnosti vrubu a podélnou osou zkušební tyče	90°	$\pm 2^\circ$	90°	$\pm 2^\circ$
Úhel mezi sousedními podélnými plochami zkušební tyče	90°	$\pm 2^\circ$	90°	$\pm 2^\circ$

Norma ČSN EN 10045-1 má národní přílohu (informativní) ve které se říká, že v České republice se zkouška rázem v ohybu provádí na zkušebních tyčích s U- vrubem s jinou hloubkou vrubu než je 5mm (např. 2mm a 3mm) a jiných šířkách tyčí než je 10 mm (například 7,5mm a 5 mm), viz materiálové listy např. 416220, 417254, 417346. Další, pouze naší národní specialitou, je stanovení již zmíněné hodnoty vrubové houževnatosti jako podílu nárazové práce k ploše průřezu pod vrubem a to v nestandardních jednotkách Joule/cm^2 . Tyto dvě dříve běžné věci, nestandardní tyč s U-vrubem a pojem vrubová houževnatost, nejsou v souladu s platnou normou ČSN EN 10045-1.[4]

Při výrobě zkušebních tyčí je třeba dbát na to, aby ovlivnění materiálu např. tvářením za studena nebo ohřevem bylo co nejmenší. V případě výroby vrubu je třeba, aby ve vrubu nebyly pouhým okem viditelné rýhy rovnoběžné s kořenem vrubu. Obdobná pravidla platí i při označování zkušebních tyčí.

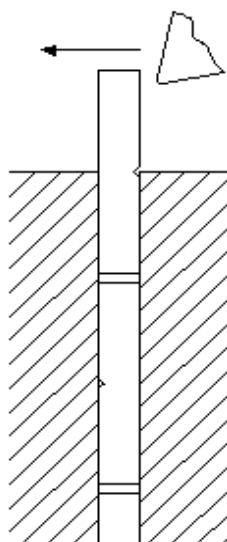
Zkušební zařízení

Zkušební zařízení musí být konstruováno a instalováno tak, aby tvořilo tuhý celek a musí být v souladu s evropskou normou EN – 10045-2. Zařízení se nazývá, jak již bylo uvedeno, rázové kladivo obr. 5.1, které se vyrábí v různých velikostech a to z důvodu požadavku na vykonání různé velikosti nárazové práce při zkoušení různých materiálů. Kladiva se nejčastěji vyrábí s maximální hodnotou potenciální energie 150J, 300J a 400 J, příp. 50J.

5.2. Izodova zkouška

Na základě metodiky Charpyho zkoušky, která se velmi dobře osvědčila na Evropském kontinentě, byly následně vyvíjeny podobné systémy zkoušení houževnatosti. Světlo světa tak spatřila takzvaná Izodova zkouška. Metoda je převážně používána zejména v USA, ve Velké Británii a některých dalších státech. Tato metoda se liší způsobem upevnění zkoušeného materiálu, následném zatížení a vyjádřením vrubové houževnatosti.

Princip je uveden na obr. 3.20. Kladivo vlastní vahou naráží ostřím do volného konce zkušební vzorku, který je upnut do speciálního upínače. Zkušební tyč je stejně jako u Charpyho zkoušky čtvercového průřezu 10x10 mm. Mezi hranou upínače a volným koncem zkušební tyče je ze strany nárazu kladiva vytvořen vrub. Kladivo je uvolněno z počáteční polohy a svojí vahou padá na volný konec zkušební vzorku, který se nárazem zlomí. Vyhodnocení je rozdíl energií čili velikostí spotřebované práce na přeražení vzorku.

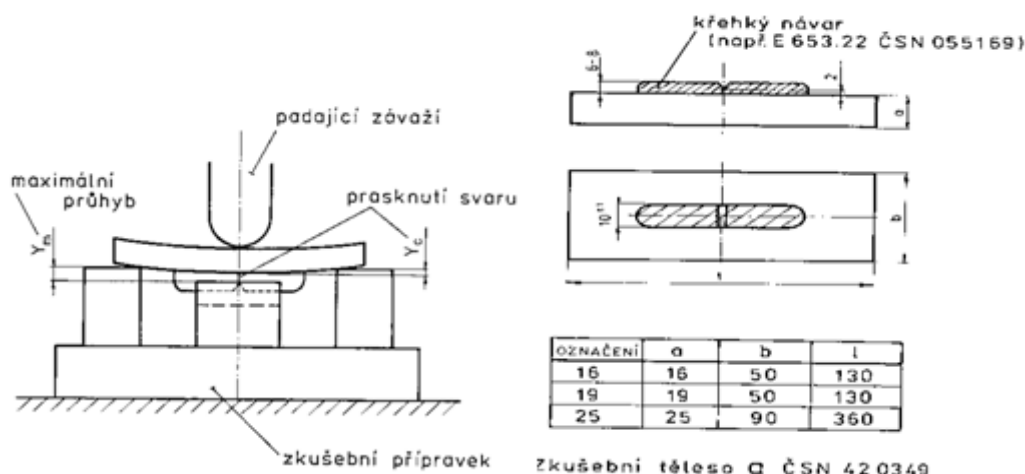


Obr. 5.3: Princip Izodovy zkoušky

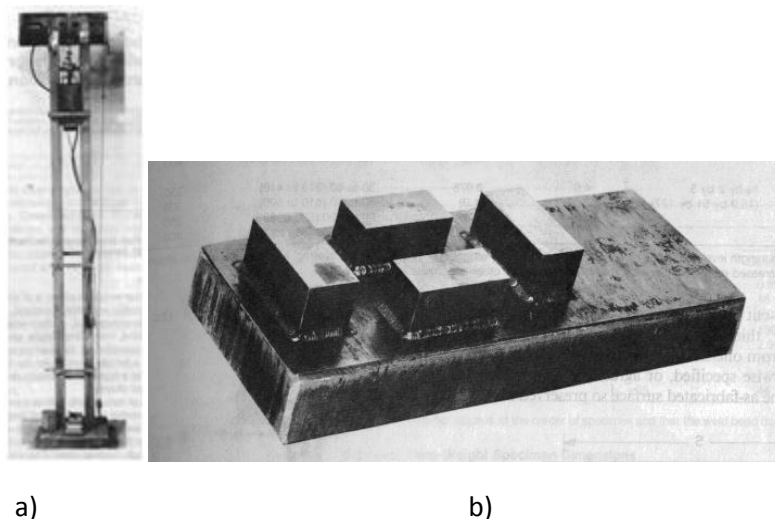
5.3. Zkouška padajícího závaží - DWT

Cílem této zkoušky je stanovení limitní teploty t_{NDT} , nad níž nedojde k nestabilnímu šíření lomu z malého, uměle vyvolaného defektu do základního materiálu a to při dynamickém namáhání a při napětí kolem meze kluzu.

Na obr. 5.4 je znázorněno zkušební těleso, což je hranol ze zkoušeného materiálu, na kterém je křehký návar na straně tahového napětí navařený křehký svar, který je navařen tvrdou elektrodou. V něm je vybroušený vrub jako iniciátor napětí pro vznik lomu. Zkušební zařízení, tzv. padostroj, je obr. 5.5. Přípravek, na který se zkušební těleso pokládá, je na obr. 11. Při zkoušce přípravek umožní pouze omezený průhyb zkušebního tělesa. Maximální průhyb tělesa je vymezený vůlí Y_m viz obr 5.4, tak aby se na straně tahové bylo tahové napětí menší než je mez kluzu zkušebního tělesa v ohybu. Zkouška se provádí při různých teplotách. Teplota, při které dojde k rozšíření trhliny ze svaru do zkušebního tělesa, je zjišťovaná teplota t_{NDT} (z anglického nul duality temperatur). Teplota se využívá ke zjištění korekci s přechodovou teplotou. Nalezne se oblast dolní ohyb převodové křivky. Její nezávislost na tloušťce zkušebního materiálu. Zkouška je normována dle ČSN 42 0349.



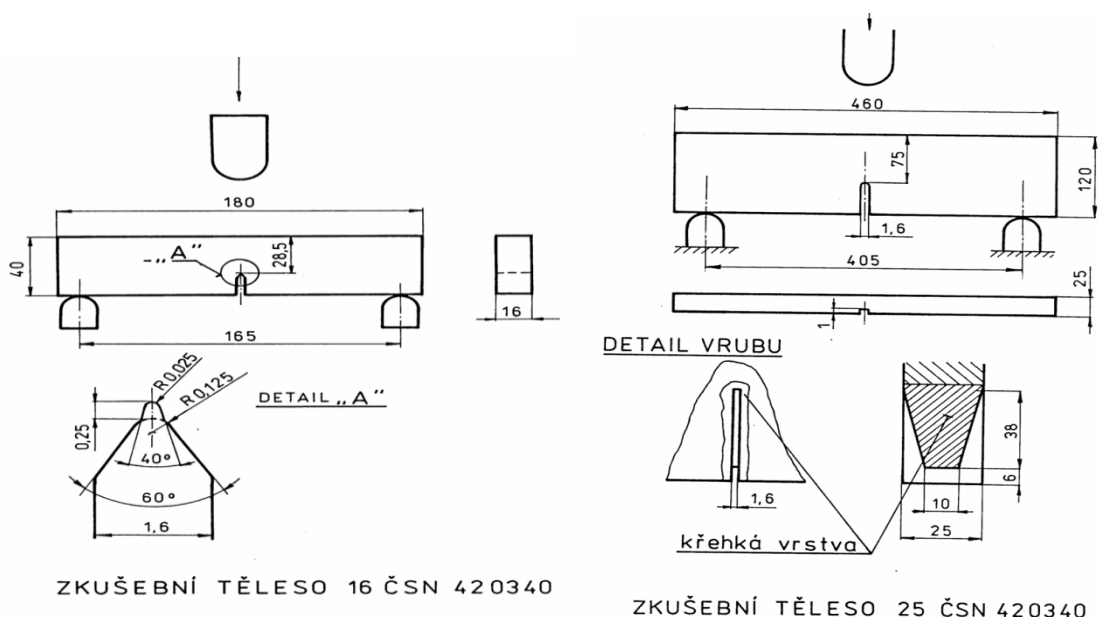
Obr. 5.4: Provedení zkoušky a zkušební tělesa [4]



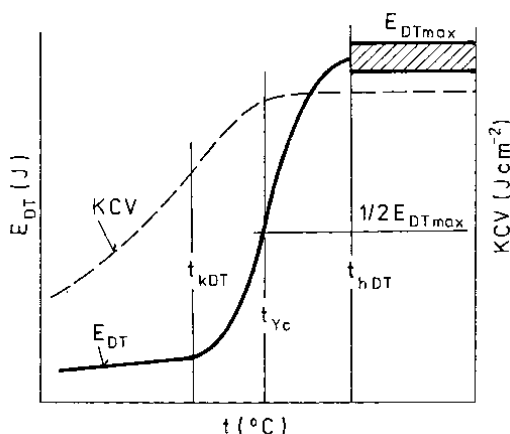
Obr. 5.5: a) provedení padostroje a b) speciální přípravek [4]

5.4. Zkouška rázem v ohybu velkých těles – DT (dynamic tear)

Tato zkouška se provádí zpravidla na obřím rázovém kladivu (energie kladiva např. 10 000 J). Ke zkouškám se používají tělesa o tloušťce 16 mm nebo 25 mm s vrubem (5.6). Cílem zkoušky je určit velikost energie spojené s lomovým procesem za mezních podmínek namáhání. Ke zkoušce se používají zkušební tělesa upravená tak, aby iniciace trhliny nastala v počáteční fázi zatěžování a tedy energie spotřebovaná k iniciaci lomu byla zanedbatelná. Zkouška se provádí při rázovém zatěžování, zjištěná nárazová práce E_{DT} představuje energii pro šíření trhliny. Teplotní průběh nárazové práce v závislosti na teplotě je uveden schematicky na obr. 5.7 (pro srovnání je ukázána i poloha teplotní závislosti vrubové houževnatosti na malých Charpy tělesech). Z této závislosti se určují tři charakteristické teploty t_{kDT} , t_{YC} a t_{hDT} . Z praktického hlediska má největší význam tranzitní teplota t_{YC} . Zkouška se provádí dle normy ČSN 42 0340.



a) b)
Obr. 5.6: Zkušební vzorky a) 1-Těleso $t=16\text{mm}$ b) 2- Těleso $t=25\text{mm}$ [7]

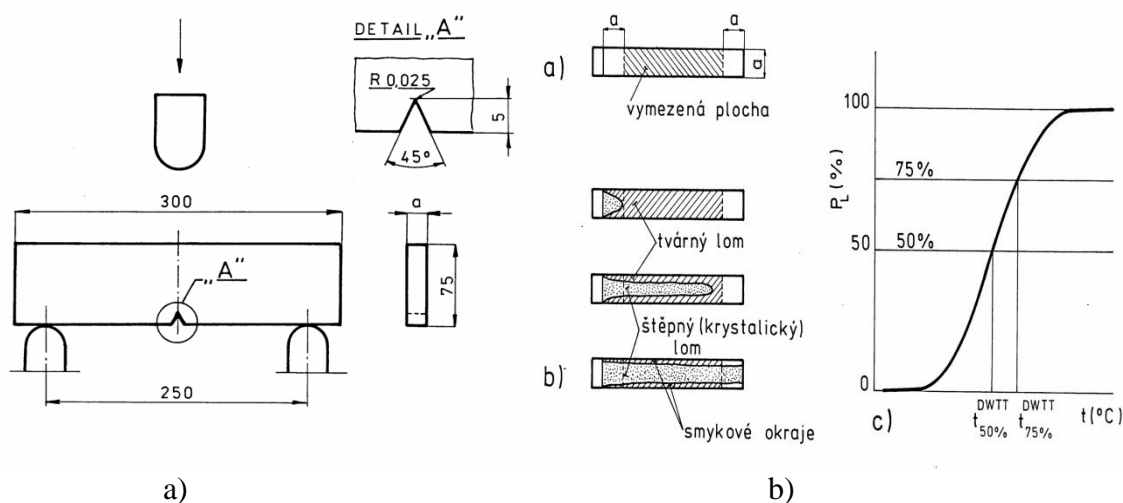


Obr. 5.7: Porovnání výsledků zkoušky DT a Charpy [4]

5.5. Zkouška padajícího závaží - DWTT

Zkoušku zavedla americká společnost „American Gas Association“. Cílem zkoušky je stanovit přechodovou teplotu ocelových plechů pro tlakové potrubí a talkové nádoby, pro skladování plynu nebo jeho rozvod.

Zkouška se provádí na zkušebních tyčích, které jsou zvláštní svými velkými rozměry a tloušťkou (obr. 5.8a), která odpovídá skutečné tloušťce plechů použitých na potrubí nebo tlakových nádob. Tato zkouška se může provádět jak na padostroji, tak i na obřím rázovém kladivu, při různých zkušebních teplotách. Energie nárazu při zatížení vzorku trojbodovým ohybem musí být tak velká, že musí dojít k porušení tělesa na první úder. Zkouška se provádí dle normy ČSN 42 0346.



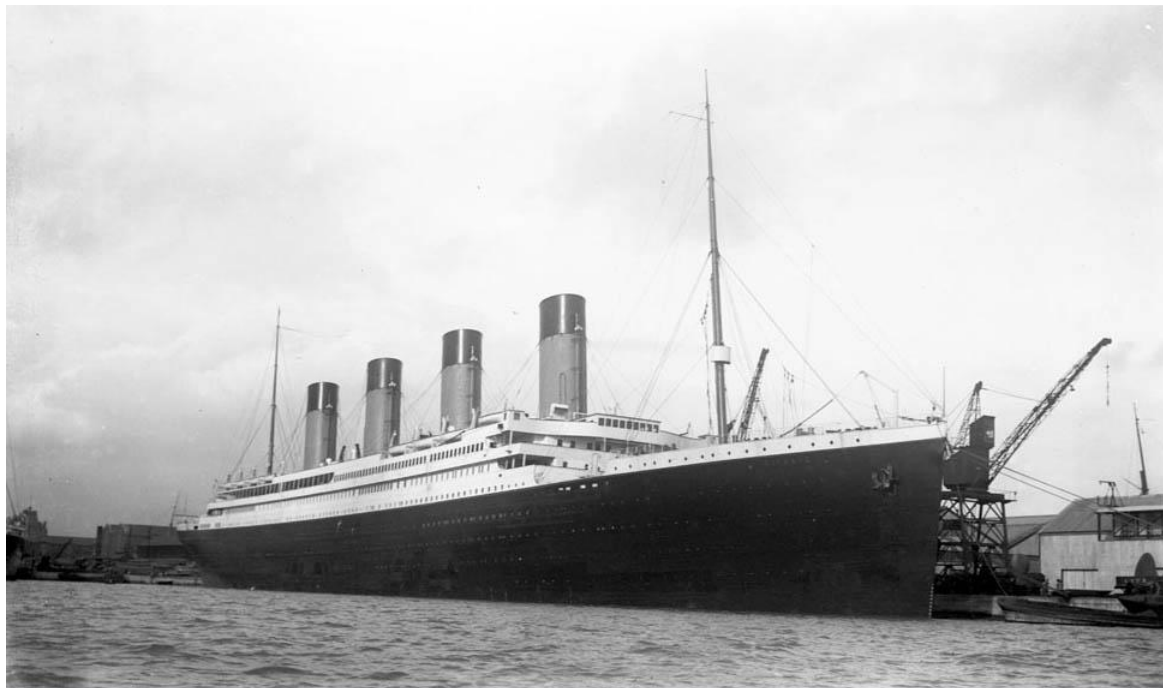
Obr. 5.8: a) zkušební těleso, b) princip vyhodnocení zoušky DWTT [7]

Po následném přeražení zkušebního tělesa následuje vyhodnocení procentuálního podílu houževnatého lomu na lomové ploše. Tyto údaje se vynesou do závislosti procento tvárného lomu na teplotě (viz obr. 5.8b).

Aplikace výsledku zkoušky DWTT mají význam zvláště pro volbu materiálu ke stavbě plynovodů. Byly ověřované destrukčními zkouškami na plynových potrubích skutečné velikosti firmou American Gas Association. Na 180 m dlouhém zkušebním úseku potrubí byl lokálním snížením teploty v blízkosti vrubu a natlakováním potrubí vzduchem vyvolán křehký lom. Ukázalo se, že křehký lom se šíří větší rychlostí (asi 1050m/s), než je rychlost dekomprese plynu (asi 400 m/s) při porušení potrubí. To však znamená, že vznik a následné šíření křehké trhliny v plynovodu způsobí značné škody na potrubí. Prakticky nedojde k zastavení lomu. Proto je nutné vyloučit u této konstrukce možnost iniciace štěpného lomu. Tvárný lom je energeticky velice náročný, v tomto případě se pouze udělá v potrubí otvor a tou plyn uniká. Plynovod je z hlediska křehkého lomu bezpečný, pokud jeho provozní teplota je nad teplotou $t_{DWTT}^{75\%}$. [4]

6. OHLÉDNUTÍ DO HISTORIE – POTOPENÍ LODI TITANIC

„Nepotopitelný“ zaoceánský parník Titanic (obr. 6.1) se vydal na svoji první a zároveň poslední cestu 10. dubna 1912. Pátý den plavby se však střetl s ledovcem a do tří hodin klesl ke dnu. To jsou strohá fakta. Jak k tomu však došlo?



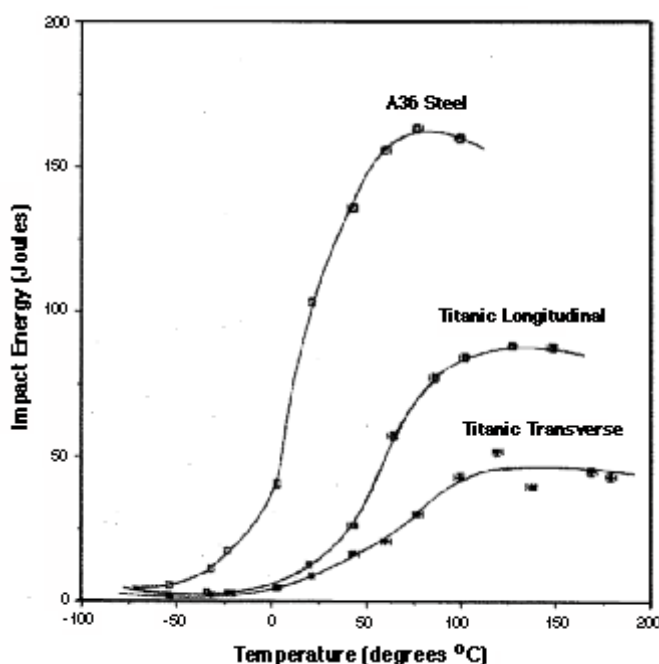
Obr. 6.1: Titanic kotví v Southamptonu [12]

Titanic, ve své době největší a nejluxusnější loď na světě s 2 207 lidmi na palubě, proploval před 11 hodinou večerní 14. dubna 1912 oblastí ledu v severním Atlantiku rychlostí 21 uzlů. Ručičky na hodinách na můstku ukazovaly 11 hodin 39 minut. Dva muži hlídky dál obhlíželi z předního stožáru zamlžený horizont. Vypadalo to, že mlha houstne, byla stále výraznější. Náhle jeden z nich zahlédl přímo před přídělí lodi něco ještě tmavšího než potměnou hladinu oceánu. Jednu nebo dvě vteřiny temný stín upřeně sledoval, zdálo se mu, že se blíží a zvětšuje. "Před námi je led," vykřikl, nato uchopil provaz zvonce umístěného ve vraním hnízdě a třikrát jím trhnul, což byl signál oznamující, že před lodí je nějaký předmět. Současně sáhl po telefonu spojujícím vraní hnízdo s můstkem. Důstojník na můstku se ohlásil téměř okamžitě. "Led přímo před námi," vykřikl hlídkující muž. "Děkuji," odpověděl důstojník na můstku (jeho zdvořilá odpověď se stala součástí legendy), zavěsil, obrátil se ke strážnímu důstojníkovi, který přibíhal z pravé strany můstku vyburcován úderem zvonu a opakoval zlověstnou zprávu, kterou právě vyslechl: „Led přímo před námi, pane.“

Strážní důstojník skočil k telegrafu a signalizoval do strojovny rozkaz k zastavení a vzápětí vykřikl na kormidelníka: "Docela vlevo!" Prakticky ve stejném okamžiku dal strojovně další rozkaz: "Plnou silou zpět!" Strážní důstojník zavelel docela vlevo a zpětný chod strojů. Bylo ale již příliš pozdě. Ledovec se rychle blížil. Titanic do něj narazil pravobokem a v tu chvíli se do nákladových prostorů a následně do kotlen začaly valit tisíce litrů vody. Strážní důstojník stáhl páku uvádějící v chod elektrické zařízení uzavírající vodotěsné dveře v přepážkách kotlen a strojoven. Nebylo to však nic platné, protože poškození trupu lodi bylo příliš velké a způsobilo rychlé zaplavení 12 z 16 vodotěsných segmentů a tudíž neodvratnou katastrofu [12].

Teorií, proč ke zkáze Titanicu došlo, je mnoho. Vina byla svalována na chybu v konstrukci lodi, ale též třeba na kletbu egyptské mumie, prorockou knihu, zlověstný diamant nebo na magický vliv hvězd. Pravda se však skrývá v materiálu, ze kterého byl vyroben trup lodi.

Houževnatost vzorků z oceli odebraných z Titanicu lze srovnat s houževnatostí vzorků běžné moderní konstrukční oceli, na obr. 6.2 je srovnání s ocelí ASTM A36 [13]. Ze závislosti nárazové práce na teplotě je zřejmé, že materiál, ze kterého byl trup Titanicu vyroben, je silně anizotropní, tedy že má v různých směrech zatěžování odlišné vlastnosti. Je vidět, že u vzorků podélně orientovaných vzhledem ke směru válcování byla houževnatost znatelně vyšší než u příčně orientovaných. Modernější typ oceli má však výrazně vyšší hodnotu nárazové práce v celém oboru měřených teplot i výrazně nižší přechodovou teplotu. Zatímco ocel ASTM A36 splňuje požadavek na hodnotu nárazové práce 27J i při záporných teplotách do -20°C , vzorky z Titanicu vykazaly v podélném směru hodnotu tranzitní teploty $T_{27J} = +32^{\circ}\text{C}$ a v příčném směru dokonce $+56^{\circ}\text{C}$. Přitom je známo, že v době kolize se Titanic plavil ve vodách s teplotou -2°C [13], tedy hluboko pod přechodovou teplotou materiálu trupu lodi.



Obr. 6.2: Porovnání tranzitního chování oceli z Titanicu a moderní oceli A36 [13]

Co je příčinou odlišného chování moderní oceli a materiálu, ze kterého byl konstruován plášť Titanicu? Vzorky oceli z vraku Titanicu vykazují velmi vysoký obsah síru a fosforu, jak je vidět v tab. 6.1 Obsah fosforu a síry je až čtyřikrát vyšší než u moderních konstrukčních ocelí. Navíc vysoký obsah těchto nečistot nebyl vyvážen dostatečným množstvím manganu. Poměrem manganu a síry byl 6,8 : 1, což není ani poloviční hodnota v porovnání s ocelí ASTM A36. Navíc u mnoha moderních ocelí je podíl Mn : S ještě

mnohem vyšší než u oceli A36. Vysoký obsah fosforu a nízký obsah manganu znamená výskyt nežádoucích sulfidů železa ve struktuře a vede ke snížení houževnatosti materiálu a posunu tranzitní teploty k nižším hodnotám. Jako další problémem, který přispěl ke katastrofě, byla identifikována již zmíněná anizotropie materiálu. Ve směru podélném (ve směru válcování) vykázal materiál lepší vlastnosti, bohužel při bočním nárazu trupu lodi do ledové kry rozhodovaly vlastnosti oceli ve směru příčném. V neposlední řadě měla na nehodě podíl i struktura materiálu, která byla tvořena hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturou, s výraznou texturou a podélně orientovanými vměstky způsobujícími anizotropii materiálu [13, 14].

Tab.6.1: Porovnání chemického složení oceli z Titanicu a ocelí A36 [13]

Chemické složení	C	Mn	P	S	Si	Cu	O	N	Mn:S
Titanic	0,21	0,47	0,045	0,069	0,017	0,024	0,013	0,0035	6,8 : 1
ASTM A36	0,20	0,55	0,012	0,037	0,007	0,010	0,079	0,0032	14,9: 1

Analýza vzorků oceli vyzvednutých z mořského dna tedy až po více než 80 letech ukázala, že příčinou katastrofy byla především nekvalitní ocel, ze které byl trup Titanicu vyroben. Obsahovala příliš mnoho síry a fosforu a v extrémně chladném prostředí severního Atlantiku se stala velmi křehkou. Při použití dnešních materiálů by trup Titanicu nárazu na ledovou kru pravděpodobně odolal. Ke cti tehdejších konstruktérů lodi však dlužno dodat, že mnohé z uvedených poznatků o vlastnostech materiálu nebyly v době plavby Titanicu k dispozici.

7. ZÁVĚR

V současné době existuje značné množství zkoušek, které umožňují hodnotit houževnatost materiálu resp. odolnost materiálu proti křehkému porušení. Tyto zkoušky byly, jsou a budou hojně využívány, protože Existuje celá řada nejrůznějších případů, kdy je potřeba hodnotit odolnost materiálu z hlediska křehkého porušení. Mezi tyto případy lze zařadit:

- klasifikace ocelí, kdy z materiálů, které jsou k dispozici, vybíráme nejvhodnější pro daný účel
- kontrola dodržení výrobního postupu, např. zda při tepelném zpracování nedošlo k výskytu popouštěcí křehkosti
- přejímání materiálu, tedy ke kontrole, zda materiál má udávané vlastnosti
- výzkumné účely - rozbor vlivu teploty nebo rychlosti zatěžování
- posouzení pravděpodobnosti výskytu křehkého lomu daného materiálu za určitých provozních podmínek
- vyšetřování příčiny lomu vzniklého za určitých provozních podmínek

Pro hodnocení materiálu zpravidla vystačíme se základní zkouškou rázem v ohybu podle Charpyho. Pro volbu materiálu na konstrukce na základě teplotně tranzitního přístupu však musíme použít některou z tranzitních teplot určenou na velkých tělesech t_{NDT} , t_{YC} nebo $t_{50\%}^{\text{DWTT}}$.

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VELES, P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Celoštátna vysokoškolská ucebnica pre hutnícke a strojárské fakulty vysokých škôl. 2. vyd., Bratislava, Alfa, 1989, 408 s.
- [2] VACH, R. *tranzitní lomové chování*, VUT FSI ÚMVI, 8 s. [Online], URL: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/04%20-%20Tranzitni%20lomove%20chovani.doc>>
- [3] CSN EN 10045-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho -Část 1:Zkušební metoda (V a U vruby)*, Praha: CNI, 1996. 24 s.
- [4] Vlach, R. *Zkoušky odolnosti oceli proti křehkému lomu, tranzitní teploty*, VUT FSI Ústav materiálových věd a inženýrství, 8 s. [Online]
URL: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/05%20-%20Mereni%20TLCH.doc>> [25.3.2010]
- [5] *Mechanické zkoušky na materiálech výrobků provozovaných za nízkých a vysokých teplot*, Portál Tlakinfor.cz, [Online]
URL: <<http://www.tlakinfor.cz>> [citace 17.5.2010],
- [6] PTÁČEK, L.a kol.: *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd., Brno, CERM, 2003. 516 s. ISBN 80-7204-283-1
- [7] *Houževnatost, tranzitní lomové chování*. VUT FSI Ústav materiálových věd a inženýrství [Online]
URL: < http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0-K/04_MS6K.ppt > [15. 4. 2010]
- [8] NĚMEC, K. *Mezní stavy materiálů*, [Online]
URL: <<http://ime.fme.vutbr.cz/vyukals.html>> [20. 4. 2010]
- [9] Klesnil, M. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*, Brno 1983
- [10] ČSN EN 10045–2: *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho Část 2: Ověřování zkušebních strojů (kyvadlových kladiv)*, vydání 1. 6. 1996
- [11] *SS Schenectady* ,[Online]
URL: < http://en.wikipedia.org/wiki/SS_Schenectady >, [26. 3. 2010]
- [12] Marášek, Z. *Titanic*. URL: http://www.titanicworld.cz/plavba/ledovec_list1.html
- [13] FELKINS, K.:*The Royal Mail Ship Titanic:Did a Metallurgical Failure Cause a Night to Remember?* JOM 50(1), 1998, p. 12-18.
URL: <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/9801/felkins-9801.html>
- [14] FOECKE, T.: *Metallurgy of the RMS Titanic*. IR 6118, NIST, 1998.
URL: <http://shipwrecks.wordpress.com/2008/01/04/metallurgy-of-the-rms-titanic/>